

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-74225

(43)公開日 平成11年(1999) 3月16日

(51)Int.Cl.⁶ 識別記号

H 0 1 L 21/285

C 2 3 C 14/34

H 0 1 L 21/203

H 0 5 H 1/46

F I

H 0 1 L 21/285

C 2 3 C 14/34

H 0 1 L 21/203

H 0 5 H 1/46

S

T

S

A

審査請求 未請求 請求項の数14 O L 外国語出願 (全 38 頁)

(21)出願番号 特願平10-164086

(22)出願日 平成10年(1998) 5月 8日

(31)優先権主張番号 08/854008

(32)優先日 1997年5月8日

(33)優先権主張国 米国 (US)

(71)出願人 390040660

アプライド マテリアルズ インコーポレ
イテッド

APPLIED MATERIALS, I
NCORPORATED

アメリカ合衆国 カリフォルニア州
95054 サンタ クララ パウアーズ ア
ベニュー 3050

(72)発明者 ジアンミン フ

アメリカ合衆国, カリフォルニア州,
サン ノゼ, サリナ ドライヴ 4631

(74)代理人 弁理士 長谷川 芳樹 (外5名)

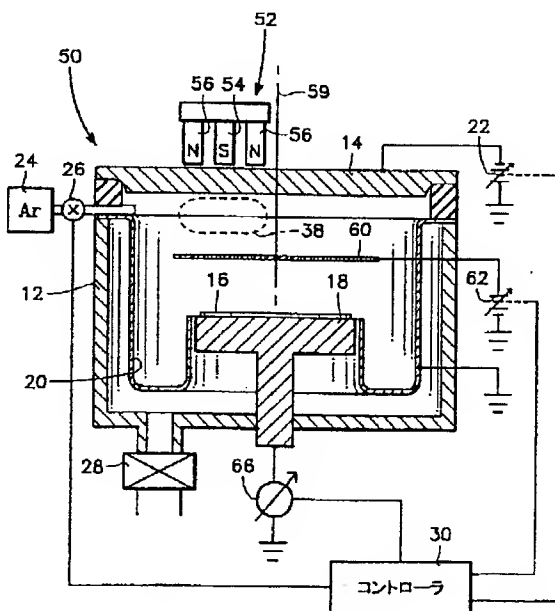
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 高密度プラズマを有する持続セルフスパッタリングリアクタ

(57)【要約】

【課題】 アルゴン等の動作ガスを必要とせずターゲットからスパッタされた原子種がプラズマを自己持続できる物理気相堆積 (PVD) 用プラズマリアクタを提供する。

【解決手段】 特に銅のスパッタリングに適用可能な自己持続スパッタリング (SSS) は、幾つかの手段によって可能になる。マグネトロンの磁石アセンブリの領域におけるプラズマの密度は、一定のターゲット電力に対して磁石のサイズを小さくすることにより高くなる。より均一なスパッタリングを行うためには、小型のマグネトロンをターゲットの裏面上で1次元的または2次元的に走査させる。ターゲットに隣接するプラズマの密度も、より平面的な形状を備えたアノードグリッドをターゲットと基板の間に配置することにより高まる。このあと基板をバイアスすることで、ウェーハに入射するスパッタ粒子束のエネルギーと指向性をより効果的に制御できる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板用の支持体を含む真空チャンバと、前記チャンバ内に配置され、前記支持体に対向するスパッタリングターゲットと、前記ターゲットに対して前記チャンバの中心部の反対側に配置された磁石アセンブリと、前記チャンバの一部分に対して前記ターゲットを電気バイアスし、前記ターゲットからスパッタされたイオンの自己持続プラズマを維持することの可能な第1の電源と、

前記ターゲットと支持体との間に配置され、ある電位にバイアス可能なグリッドと、

前記グリッドに対して前記支持体を電気バイアスする第2の電源と、を備える持続セルフスパッタリング装置。

【請求項2】 前記第2電源は、前記支持体を前記グリッドに対して負DCバイアスする、請求項1記載のスパッタリング装置。

【請求項3】 前記第2電源がRF電源である請求項1記載のスパッタリング装置。

【請求項4】 前記第ターゲットが銅を含んでいる請求項1記載のスパッタリング装置。

【請求項5】 前記磁石アセンブリは、その磁石部分の間に前記ターゲットの面積の2.5%以下の面積を有している、請求項1記載のスパッタリング装置。

【請求項6】 前記グリッドは、前記ターゲットから2～6cm離れた範囲内に配置されている、請求項1記載のスパッタリング装置。

【請求項7】 前記中心軸のまわりに回転可能な円板であって、前記磁石アセンブリがスライドするスロットを有している円板と、

前記円板に取り付けられ、前記磁石アセンブリの位置を前記スロット内で選択的に制御する駆動手段と、を更に備え、前記磁石アセンブリが前記ターゲットのフェースの平面と平行に往復直線運動できるようになっている請求項1記載のスパッタリング装置。

【請求項8】 ターゲットと、前記ターゲットの一側に位置する磁石アセンブリと、基板を支持する基板支持体と、前記ターゲットと前記支持体との間に配置されたグリッドとを備えるスパッタリングチャンバにおけるスパッタリング方法であって、

前記グリッドを所定の電位に保持するステップと、

前記チャンバ内において前記ターゲットの付近でプラズマを点火するステップと、

前記プラズマが点火された後、前記チャンバの内部を 5×10^{-3} Torr未満の圧力に保持するとともに、前記チャンバの空間内において前記磁石アセンブリの付近にターゲットプラズマを自己持続させるのに十分な電力を前記ターゲットに供給するステップと、を備える方法。

【請求項9】 前記ターゲットが銅を含んでいる請求項8記載の方法。

【請求項10】 前記磁石アセンブリを前記ターゲットの裏面の付近で移動させるステップを更に備える請求項8記載の方法。

【請求項11】 前記移動ステップは、前記ターゲットを貫通する軸のまわりに前記磁石アセンブリを回転させるサブステップと、前記ターゲットのフェースと平行な方向に前記磁石アセンブリを往復平行移動させる独立サブステップと、を含んでいる、請求項10記載の方法。

【請求項12】 前記十分な電力が20kW未満である請求項8記載の方法。

【請求項13】 前記点火ステップは、前記チャンバに動作ガスを流入させるステップと、ターゲットに電力を供給して前記動作ガスを点火し、プラズマを生成するステップと、前記ターゲットプラズマを自己持続させるのに十分な電力の前記ターゲットへの前記供給を続けながら、前記動作ガスの前記流入を止めるステップと、を備えている、請求項8記載の方法。

【請求項14】 前記圧力が 10^{-6} Torr以下である請求項9記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、全般として半導体集積回路などの被処理体のプラズマ処理に関し、特に、持続セルフスパッタリングを用いた物理気相堆積(PVD)に関する。

【0002】

【従来の技術】最新の半導体集積回路の重要な部分としては、アクティブ半導体領域と接触して相互接続するために使われる一つ以上のメタライゼーションレベルが含まれている。このメタライゼーションレベル自体は、通常、極めて良好に画定された結晶シリコン基板中に存在している。数個のトランジスタやその他の半導体デバイス(例えばメモリキャパシタ)を半導体レベル内で相互接続することは可能であるが、多重接続されたデバイスの形状が徐々に複雑になるにつれて、更なるレベルの相互接続が必要とされている。通常、内部にトランジスタおよびキャパシタが形成されているアクティブシリコン層は、誘電体層(例えば二酸化シリコン)によって被覆される。コンタクトホールは、誘電体層を貫通してシリコンコンデバイスの特定のコンタクト領域に到達するようにエッチングされる。コンタクトホールの中に金属が充填されるとともに、誘電体層の最上部にも金属が堆積させられてシリコンコンタクトと他の電気的な点との間に水平相互接続を形成する。このようなプロセスは、メタライゼーションと呼ばれる。

【0003】単一レベルのメタライゼーションは、小容量の単純な集積回路には十分であるかもしれない。しかし、高密度のメモリチップや特に複雑な論理デバイスの場合は、単一レベルでは必要なレベルの相互接続がアク

ティブ領域間に形成されないので、メタライゼーションレベルの追加が必要となる。追加メタライゼーションレベルは、前にメタライズした水平相互接続の上に別の誘電体レベルを堆積させた後、この誘電体を貫通する孔（ここではビアと呼ぶ）をエッチングし、このビアに金属を充填すると共に追加誘電体層を金属で被覆し、その追加誘電体の上の金属を追加配線層として画成するというプロセスを繰り返すことによって得られる。極めて最新の論理デバイス、例えば第五世代のマイクロプロセッサは、5レベル以上のメタライゼーションを有している。

【0004】従来、メタライズ層は、アルミニウムや多くとも数パーセントの合金元素（例えば、銅やシリコン）を更に含んだアルミニウムベースの合金から構成されていた。通常、メタライゼーションデポジションは、スパッタリングとしても知られる物理気相堆積（PVD）によって行われてきた。従来のPVDリアクタ10は、図1に断面が略図的に示されている。この図は、カリフォルニア州サンタクララのアプライドマテリアル社（Applied Materials, Inc.）から市販されているEndura PVDリアクタに基づいている。このリアクタ10は、ヒータベDESTAL 18上に保持されたウェーハ16上にスパッタ堆積すべき材料からなるPVDターゲット14に対してシールドされた真空チャンバ12を含んでいる。このチャンバ内に保持されたシールド20は、チャンバ壁12をスパッタ材料から保護するとともに、アノード接地面を与える。選択可能なDC電源22は、ターゲットをシールド20に対して約-600VDCに負バイアスする。従来から、ベDESTAL 18とウェーハ16とは、電気的に浮動した状態になっている。

【0005】スパッタリング用の動作ガス（通常は、化学的に不活性なアルゴン）のガスソース24は、マスフローコントローラ26を介して動作ガスをチャンバに供給する。真空システム28は、チャンバを低圧に維持する。基本圧力は約 10^{-7} Torr以下に保持することができるが、動作ガスの圧力は約1~1000 mTorrの間に保たれる。コンピュータ式コントローラ30は、DC電源22およびマスフローコントローラ26を含むリアクタを制御する。

【0006】アルゴンがチャンバ内に入れられると、ターゲット14とシールド20との間のDC電圧がアルゴンを点火してプラズマを発生させ、正に帯電したアルゴンイオンが負に帯電したターゲット14に引き寄せられる。これらのイオンは、大きなエネルギーでターゲット14に衝突し、ターゲットの原子または原子クラスターがターゲット14からスパッタされるようにする。ターゲット粒子の一部はウェーハ16に衝突し、それによってウェーハ上に堆積してターゲット材料の膜を形成する。

【0007】効率の良いスパッタリングを行うために、マグネトロン32がターゲット14の背後に配置され

る。このマグネトロンは、対向する磁石34、36を有しており、これらの磁石34、36は、磁石34、36の近傍でチャンバ内に磁場を発生させる。この磁場は電子を捕捉し、また電荷的中性のためにイオン密度が増加して、マグネトロン32の付近のチャンバ内に高密度プラズマ領域38を形成する。

【0008】集積回路の継続的な小型化に伴って、メタライゼーションに対する要求が増大している。現在、多くの人々は、アルミニウムメタライゼーションの代わりに銅メタライゼーションを用いるべきだと考えている。ムラルカ（Murarka）らは、「ULSI以上のための銅メタライゼーション（Copper metallization for ULSI and beyond）」（1995年、Critical Reviews in Solid State and Materials Science, vol.10, no.2の87~124頁）の中で銅メタライゼーションについての総合的な評論を提示している。銅は、多くの利点を示す。銅のバルク抵抗はアルミニウムのバルク抵抗よりも小さく、純粋な材料については $1.67 \mu\Omega\text{-cm}$ 対 $2.7 \mu\Omega\text{-cm}$ である。抵抗の減少は、メタライゼーション相互接続部の幅と厚さの減少をもたらすので、大きな利点となる。更に、アルミニウムメタライゼーションに伴う継続的な問題は、高い電流密度を運ぶアルミニウム相互接続部内のアルミニウム原子が、エレクトロマイグレーションと呼ばれるプロセスにおいて特にホットスポットから相互接続部に沿って移動するという傾向である。このようなマイグレーションの量が過大になると、アルミニウム相互接続部が切断され、集積回路が破壊されることになる。銅ベースの合金は、かなり低いレベルのエレクトロマイグレーションを示す。

【0009】銅メタライゼーションは、まだ立証されていない技術であり、従来のアルミニウムメタライゼーションでは経験のない困難さを伴うことも認められている。しかしながら、銅メタライゼーションには、アルミニウムメタライゼーションに固有の問題点を回避する道を開く可能性もある。

【0010】従来のスパッタリングに固有の一つの問題は、アルゴンなどの不活性動作ガスの相当に高い圧力の中でスパッタリングが行われることである。しかしながら、アルゴン環境は二つの問題を提示する。第1に、一部のアルゴンイオンが基板上に堆積してスパッタ堆積したアルミニウム中に入り込むことを避けられないことである。このような通常は不活性のアルゴンイオンの影響は正確には知られていないが、おそらく好ましいものではない。

【0011】第2の問題は、スパッタ粒子の指向性に関係している。ホールを充填するスパッタリングは、ターゲットからウェーハへ弾動的に、すなわち当初のコースから散乱せずに輸送されるスパッタ粒子に少なくとも部分的に依存している。この弾道軌跡により、スパッタ粒子は、ウェーハの表面に対してほぼ垂直にウェーハに

到達して、いかなる開口部の中にも深く侵入することが可能になる。しかしながら、通常のスパッタリングは、1~100mTorrのアルゴン雰囲気中で行われる。このような高い圧力は、アルミニウムスパッタ粒子がアルゴン原子と衝突して自己の弾道経路からそれてしまう可能性が大きいことを意味している。したがって、低圧スパッタリングは、深いビアに対してより良いホール充填を提供するものと考えられている。しかしながら、一般に、低い圧力は低い堆積速度と同等と考えられるから、圧力を下げることは、より良い指向性を得るために好ましい方法ではない。更にまた、図1の通常の構成でプラズマを持続させるためには、1mTorrに近い最低限の圧力が必要となる。

【0012】高密度プラズマ(HDP)スパッタリアクタは、活発に開発されており、商業化に近づきつつある。HDPスパッタリングの利点の一つは、スパッタ粒子のかなりの部分が基板に向かう行程中にイオン化されることである。この後、ウェーハを支持するベDESTALは、正に帯電したプラズマに対してDC自己バイアスを発生させるように、RFソースによって選択的にバイアスをかけることができる。その結果、ウェーハはプラズマに対して負バイアス(-20Vが通常の値)され、正に帯電したスパッタイオンは、一般に中性のプラズマから基板に向かって加速される。この加速された速度は、*

$$\alpha \cdot \beta \cdot S_s = 1$$

のように表すことができる。ここで、 α はターゲットからスパッタされた原子のイオン化率、 β はターゲットに戻るスパッタ原子の比率、 S_s はセルフスパッタ率、すなわち銅ターゲットの場合、1個の戻り銅原子によってターゲットからスパッタされる銅原子の数である。イオン化率と戻り率は、材料および電流密度に依存するが、これらは必ずしも1よりも小さい。一般に、積 $\alpha\beta$ は、高い電流密度のもとで増加する。したがって、セルフスパッタ率の大きな値は、持続セルフスパッタリングにとって極めて重要であり、高い電流密度もまた重要である。従来のメタライゼーション材料であるAlやAlホール充填で用いられる他の金属、すなわちTi、Mo、W、およびTaは、1以下のセルフスパッタ率を持っており、したがってこれらの材料を持続セルフスパッタリングで使用することはできない。しかしながら、Cuは、Pd、Pt、Ag、Auと同様に、セルフスパッタリングについて許容しうる値を有している。

【0015】麻時らは、「平板マグネトロンによる銅のセルフスパッタリング」(1994年、日本応用物理誌、第33巻、第1部、第5A号、2500~2503頁)と「セルフスパッタデポジションによるサブミクロンスルーホールの充填」(1994年、日本応用物理誌、第33巻、第1部、第8号、4566~4569頁)において、銅のSSS堆積を報告している。彼らは、後者の引用文献の中で、約3というアスペクト比を

* 基板平面に垂直で高い指向性を持ち、これにより高いアスペクト比のホールの中に深く到達するフラックス(束)を与える。欧州特許公報703,598-A1号でヌルマン(Nulman)は、基板とアルゴン動作ガスを用いるHDPソースとの間に負バイアスグリッドを挿入する手法を開示している。

【0013】持続セルフスパッタリング(SSS)を用いた銅膜のPVDデポジションに最近多くの関心が集まっている。これは、例えば「直流マグネトロンソースを用いた持続セルフスパッタリング(Sustained self-sputtering using a direct current magnetron source)」(1993年、Journal of Vacuum Science and Technology, A, vol.11, no.6の2980~2984頁)の中でポサドースキ(Posadowski)らによって開示されている。少なくともプラズマが点火された後では、持続性スパッタリング中に動作ガスは使われない。その代わりに、ターゲットからスパッタされた十分な数の原子がイオン化された後、これらの原子は、より一般的なアルゴンイオンの代わりのスパッタリングイオンとして働くように十分に高いエネルギーでターゲットに引き戻される。

【0014】特殊な条件下で幾つかのターゲット材料についてだけ観測される自己持続性スパッタリングの達成条件は、

(1)

持った0.4 μ mホールにおける非常に良好なボトムカバレージを報告している。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、これら既知のSSS研究は実験的な性格を持っており、持続セルフスパッタリングが大きな集積回路市場で商業化できるまでには幾つもの困難な問題に取り組む必要がある。

【0017】大抵の新しい半導体製造設備は、200mmのウェーハサイズ用に開発されており、300mmウェーハ製造用の新しい開発という点では、銅SSSなどの新しいテクノロジーが200mmで使えることを示し、300mmにスケールアップできるものと考えer必要がある。200mmウェーハ用でさえ、商業用PVDリアクタの代表的なターゲット直径は約325mmである。

【0018】従来のアルミニウムPVDの場合であっても、妥当な堆積速度で200mm以上にわたって一様なPVD堆積を達成することは、かなり難しい。米国特許第5,242,566号のパーカー(Parker)と米国特許第5,320,728号のテップマン(Tepman)は、腎臓形の輪郭に沿って配列されたほぼ直線的な配列の磁石を有するマグネトロンを開示しており、この磁石アレイは、腎臓形の内部の一点、あるいは腎臓形を通過する直径の半分ずつを有する一点を中心としてターゲットの裏側で回転する。この磁石アレイは、200mmウェーハを覆う325m

mターゲット用のウェーハサイズに近いサイズを有している。磁石アレイの大きなサイズは、さらに大きな磁石に向かう傾向と一致している。しかしながら、本発明者は、銅の持続セルフスパッタリングのための従来のテップマン設計をテストしたが、持続セルフスパッタリングを得ることができなかった。

【0019】従来のテップマン式マグネトロンは、チャンバ内に約200ガウスの磁場を発生させる。この磁場の強さは、高いプラズマ密度を必要とする持続セルフスパッタリングのためには幾分低い。高いプラズマ密度は、高い磁気強さに少なくとも部分的に依存している。しかしながら、テップマンの拡張配列は、幾つかの更に基本的な問題を提示する。

【0020】第1に、高密度(HDP)プラズマ内の電子は、側方へ急速に拡散する傾向がある。テップマンの腎臓形配列では、他の線形磁石アレイと同様に、直線的に集中した磁場分布が低磁場領域によって両側を囲まれている。すなわち、HDP電子は、HDP領域から遠くへ拡散して失われる傾向があり、それによってSSSに必要な高いレベルからプラズマ密度が低減してしまう。

【0021】第2に、テップマン配列における比較的高い磁場の領域は、ターゲットの比較的大部分に広がっている。この大きなカバレージは、均一性を高めるものの、ターゲットに印加される所定量の電力に対して、この大面積が高密度プラズマ中の電力密度を減少させることを意味する。大型の商用PVDリアクタの場合には、セルフスパッタリングを持続させるためにテップマン式マグネトロンで必要とされるターゲット電力量は、あまりに大きくなりすぎる。

【0022】銅の持続セルフスパッタリングの報告は、約200mA/cm²の電流密度が必要であることを示しているように思われる。全く従来型のPVDリアクタ内で固定磁石を用いて好適にSSSを行うためにターゲットに印加されるDC電力は、50mmターゲットに対しては6kW、100mmターゲットに対しては16kW、200mmターゲットに対しては20kWであった。このスケール傾向は、均一性のために極めて大きなターゲットを必要とする200mmや300mmウェーハに対しては、従来技術の従来の大きさのマグネトロンを使うと仮定した場合、DCバイアス電力が35kW~50kWとなることを示している。このような電力レベルは、商用装置としては実用的でないと思われる。12kW電源が経済的に有利であり、20kW電源が許容限界であると思われる。

【0023】上記の理由から、大きなターゲットに対しても少ない電力レベルで持続セルフスパッタリングを達成することが望まれている。更に、スパッタイオンの付加的な指向性制御を与えることが望まれている。

【0024】

【課題を解決するための手段】持続セルフスパッタリン

グリアクタ(特に、銅のスパッタリングに適用可能なもの)であって、このリアクタでは、磁石アセンブリ(好ましくは、円形に配列された磁石)の面積を低減し、ターゲットとスパッタ堆積が行われる基板との間にアノードグリッドを配置することにより、マグネトロンの付近のプラズマ密度が高める。小さな磁石サイズ(特に、小さなアスペクト比のコンパクトな形状を有する磁石アセンブリに関するもの)により、比較的少ないターゲット電力で自己持続性スパッタリングを行うことが可能になる。小型磁石を用いた持続セルフスパッタリングの均一性は、ターゲットの裏面の付近でマグネトロンを回転させるか、さもなければ移動させることによって改善される。基板を支持するベDESTALをグリッドに対してバイアス(例えば、DCバイアスやRFバイアス)することにより、基板に入射するスパッタ粒子の指向性を高めることができる。

【0025】スパッタリングの均一性は、ターゲットの裏面の付近で1次元的または2次元的に磁石を走査することによって向上する。

【0026】

【発明の実施の形態】本発明者は、マグネトロンに付随する高密度プラズマの体積を低減することによって、持続セルフスパッタリングを商業市場に適用することに伴う問題の多くを、解決できないまでも低減することができると考えている。これらの方法はまた、均一性を高め、より異方性のスパッタ粒子束を提供し、デバイスのダメージを低減するために有益な付加的制御を与える。

【0027】新規なSSS PVDリアクタ50の相互に関連する三つの特徴を図2の断面図に概略的に示す。

これらの特徴は、図1の従来のアルゴンベースPVDリアクタ10に対して大きな変更を与えないので、その開発と現場保守は容易である。

【0028】新規の小型マグネトロン52は、ターゲット14の裏面に対向する一の極性のボタ磁石54および他の極性の環状磁石54を備えることができる。磁石54、56の裏面上の磁気ヨーク58は、磁場を閉じ込める。マグネトロン52は、チャンバの中心軸59から離して配置してもよいし、均一性を高めるために軸59のまわりに円形に走査してもよい。マグネトロン52のサイズが小さいので、持続セルフスパッタリングのしきい電力レベルが低くなる。

【0029】グリッド電極60は、ターゲット14とベDESTAL18との間に配置されている。この電極はアノードとして機能するように接地させてもよいし、プラズマ密度を高めるために、第2の変換DC電源62によって電気的に(好ましくは正に)バイアスしたり、あるいはRFバイアスしてもよい。しかしながら、本発明者は、グリッド60を接地しておけば多くの用途で十分であると考えている。グリッド60は、ターゲット14から約2~6cm離して配置することが望ましい。この位

置は、高密度プラズマ38内の電子軌道に干渉する程には近くないが、アノードとして依然として有効に機能する程度には近い、すなわち形状寸法が平面的でプラズマの広がりを防ぐ程度に近い。このグリッド電極は、さらに平面的な形状寸法を提供してマグネトロンプラズマの密度を増加させるとともに、イオン輸送に対して付加的制御を与える。

【0030】ベDESTAL18は、選択可能な電源66（DC電源やRF電源やこれらの組み合わせとすることができ）によって、特にグリッド60に対して電気バ
10 イアスすることができる。このベDESTALバイアスは、プラズマの生成およびプラズマイオン密度の増加に必要な電気バイアス条件とは比較的独立して行うことができる。したがって、このベDESTALバイアスは、高い指向性のホール充填やその他の処理特性のために、より自由に最適化することができる。

【0031】図1の従来のリアクタ10では、高密度プラズマ領域38がカソードターゲット14とアノードシールド20との間で結合されている。その結果、電場にか
20 かなりの水平成分が存在し、プラズマイオン電流のかなりの部分がシールドに接地されるので、有効なイオン電流を減少させ、高密度プラズマ領域38を広げてしまう傾向がある。すなわち、プラズマ密度はそれほど高くない。

【0032】図2の本発明のリアクタ50では、グリッド電極60は、カソードターゲット14の大部分に平面的に対向するアノードグリッドとして機能する。この平面形状により、高密度プラズマ38が広がり分散して低密度になる傾向が抑えられる。スパッタイオンのうちシールド20へ失われる部分は、従来のリアクタに比べて
30 かなり減少する。

【0033】グリッド60は、最小の厚さと高い透過性を有するスクリーン状のグリッドとすることができる。この代わりに、グリッド60は、多数の細い貫通孔が
40 けられた相当な厚さを有する金属ハニカムや金属コリメータプレートであってもよい。更にまた、グリッド60は、図3に等角図的に示されるチムニー形構造70であってもよい。このチムニー形構造70は、金属リブ78のオフセットセット（offset set）によって機械電氣的に連結された3個の同軸金属チューブ72、74、76を備えている。これらのチューブ72、74、76とリブ78は、リアクタ50の軸59に沿って最小の断面を有しており、これによって比較的大きな軸方向開口部80を備えている。テップマンは、米国特許第5,527,438号において、異なる用途の幾分類似したコリメーティングチムニーを開示している。本発明の用途では、チムニー70は、シールド20の内側に配置され、シールドに接地されるか、あるいは第2のDC電源62によって個別に電気バイアスされる。

【0034】プラズマ特性は、ターゲット14およびグ

リッドアノード60によっては完全に定まる。その結果、ベDESTAL電源66は、プラズマ維持の必要性をあまり考えずに処理上の考慮に基づいてバイアス条件をさらに自由にウェーハ16に適用することができる。例えば、ベDESTAL18は、グリッド60を貫通する正に帯電したスパッタイオンを加速し、深い開口部を充填するためにこれらイオンの指向性が高まるように、グラウンドに対して負にバイアスすることもできる。一方、負バイアスをより小さくすると、入射イオンのエネルギーが低くなり、基板のダメージが低減する。

【0035】持続セルフスパッタリング時におけるグリッド60とベDESTAL18との間のプラズマは、通常の平衡プラズマであるとは考えられていない。電子のエネルギーは、通常のスパッタリング時の値よりもはるかに高い約5 eVであると測定され、プラズマ電子に関する衝突率が低いことを示している。それにもかかわらず、希薄なプラズマがグリッド60の下方に存在してベDESTAL18の付近に広がると考えられており、またプラズマシースが恐らくは静電気効果のためにベDESTAL18に隣接して存在していると考えられている。その結果、ベDESTAL18は、プラズマイオンに対してDC自己バイアスを生成するようにRFバイアスしてもよい。

【0036】本発明のマグネトロ52は、従来のリアクタのものよりも相当に小型である。一例として、図4の拡大斜視部分断面図に示されるように、その北極が例えば下方を指している円形ボタン磁石54は、その南極が下方を指しているリング磁石56によって取り囲まれている。円板形磁気ヨーク58は、ターゲット14に隣接する磁場82を強める。この磁石アセンブリの円形構成は、さらに効果的な高密度プラズマを与える。その理由は、得られる高密度プラズマ領域38が実質的に円形であり、電子の逃げ道となる自由側面を一つしか有しないからである。ボタン磁石54の下の磁気カusp（magnetic cusp）は、電子が横断して拡散できる程度に小さな面積を有している。

【0037】図4に関して図2に示すように、磁石アセンブリの面積はスパッタされるターゲットの面積の実質的に半分未満か4分の1未満であり、これにより、高密度プラズマ領域38における高いターゲット電力密度のために必要な全ターゲット電力が低減されている。

【0038】マグネトロ52の磁石アレイが図示のように一つの円に配列されている場合、磁石アセンブリの直径は、スパッタされるターゲット領域の直径の半分未満である。すなわち、その面積は、ターゲットの面積の25%未満である。本発明者は、9 kW電源でセルフスパッタリングを持続できるようにするためには磁石アセンブリが125 mm以下の最大直径（最大面積123 cm²）を有する必要があることを実験的に求めた。20 kW電源の場合は、推定最大面積は272 cm²（最大直径185 mm）である。マグネトロ52は、中心軸

59から完全に離して配置される。均一性を与えるためには、マグネトロンを中心軸56を中心として円周状に走査することが必要である。これは、バーカーとテップマンも同様に行っている。但し、彼らの磁石アセンブリは、本質的に中心軸59を取り巻いている。この走査は、図5に示すように、中心軸59に沿って延びるシャフト92上で回転する円板90の上にマグネトロン52をしっかりと設置することによって行うことができる。

【0039】図6に概略的に示すように、固定点から駆動することのできる回転円板上の動的径方向位置決め機構を備えることによってスパッタリングの均一性を更に高めることが望ましい場合もある。この均一性は、全面浸食によってターゲット利用度を高めるという利点と、スパッタされない領域上への再堆積から生じるパーティクルを減らすという利点を持っている。径方向位置決め機構の一例は、円板90中の図示しない径方向スロット内をスライドするロッド94上にマグネトロン52を支持するものである。ロッド92は、スプリング96によって一つの径方向に付勢されており、空気圧式アクチュエータ98によって反対の径方向に選択的に押し込まれる。このアクチュエータには、圧力ライン100を通じて流体圧力が選択的に供給される。この圧力ラインは、円板90を回転させる回転シャフト92内に延び、回転シャフト92に沿って上方に延在している。シャフト90の最上部における図示しない回転シールは、選択的に可変圧力に付勢される固定流体ラインにつながっている。これによって、マグネトロンは、中心軸56を中心として回転するとともに、ターゲット14のフェースに平行な直線方向に沿って往復運動する。

【0040】図4の円形磁石構成は、コンパクトな平面領域の高密度プラズマ38という利点を与え、電子の損失が最小限に抑えられ、持続セルフスパッタリングの電流密度しきい値が減少するようにする。定量的に表現すれば、この円形構成は、1:1のアスペクト比を与える。ここで、このアスペクト比は、磁石アセンブリの最大横寸法対最小横寸法として定義される。これらの寸法は、反対の極性を持つ磁石間に強い磁場が存在する領域、あるいは反対の極性を持つ磁石の間隔にほぼ等しい距離だけ横方向外向きに延びる領域しか含まない。このため、テップマン構成の最小横寸法は、腎臓形の曲線長さになる。1に近いアスペクト比は、電子が失われる可能性がある側面の表面積を最小限に抑える。図7の平面図に示すように、1に近いアスペクト比を有する別の磁石構成は、一つの極性を有する2個の方形磁極102、104を含んでいる。これらの磁極は、反対の極性を有する別の方形磁極106を挟みつつ、図面の外側を向いている。各磁極102、104、106は、その磁極の形に配列された同一極性を有する複数の小さな磁石から構成されていてもよい。このアセンブリの幅は、アスペクト比がほぼ1.4、すなわち対角線対幅の比になるよ

うに、その図示の高さにほぼ等しくなっている。他の磁石構成も可能であり、例えば図4の卵形バージョンや、図7のわずかに延長または圧縮したバージョンも可能である。アスペクト比の好適な範囲は、1:2~2:1である。

【0041】実験

上述の特徴の幾つかを用いて銅の持続セルフスパッタリングのコンセプトをテストした。図4のボタン磁石およびリング磁石は、総直径11.5cmのものを使った。

このため、磁石面積は、325mm銅ターゲットの面積の15%であった。これらの磁石は、NdBFeから構成されており、チャンバ内部に800ガウスの磁場を発生させるものと推定された。マグネトロンは中心軸から離して配置し、その軸を中心として回転させた。接地アノードグリッドとしては図3のチムニーグリッドを使ったが、ある実験ではその代わりにハニカムコリメータを使った。ターゲットと基板との間の間隔は、10~16cmの範囲内に維持した。

【0042】この構成を用いた最初の一連の実験では、種々のレベルのDC電力を銅ターゲットに供給した。各レベルについて、プラズマが消えるまでアルゴンの流量を低減した。最小の流量レベルで、チャンバ圧力とターゲット電圧を測定した。この結果を図8に示す。この図では、曲線112はプラズマを維持する最小のアルゴン圧力を示し、曲線114はその圧力におけるターゲット電圧を示しており、これらは双方ともターゲットに与えるDC電力の関数として示されている。低いターゲット電力に対しては、約0.1mTorrの最小アルゴン圧力が必要であることが分かる。しかしながら、9kW以上では、プラズマを持続させるのにアルゴンは必要でない。セルフスパッタリングプラズマを伴うチャンバ圧力は、 10^{-6} ~ 10^{-7} Torrと測定された。これらの圧力は、ベークアウトなどに注意することで低減することができると思われる。持続セルフスパッタリング中のこのような低いチャンバ圧力は、約30m以上の平均自由散乱距離に対応しており、したがって商業的に実現可能なチャンバ内では感知し得るほどのガス散乱は存在しないことが分かる。この距離は、持続セルフスパッタリング中のチャンバ圧力は 10^{-6} Torr以下の圧力が望ましいものの 10^{-5} Torrまたは 5×10^{-5} Torrでも許されることを示している。後述するように、これらの圧力では、アルゴンがチャンバ内で放電することはない。ターゲット電圧は持続セルフスパッタリングのために幾分増加するが、約-600VDCの付近にある。

【0043】持続セルフスパッタリングの動作上の特徴は、プラズマが自己点火しないが、ターゲットがスパッタリング粒子を供給しはじめるまで最初のうちはスパッタリング動作ガスを供給する必要があるということである。SSSプラズマを点火するために有用な一つ

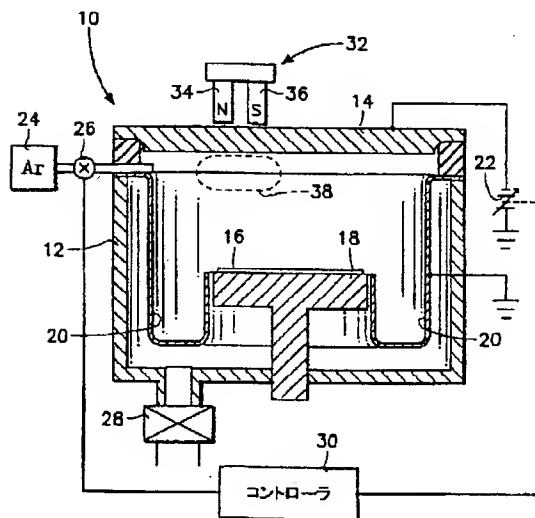
のタイミング図が図9のタイミング図に示されている。最初、アルゴンが、プラズマを持続させると知られている流量でチャンバ内に流入させられる。アルゴン流量が安定してチャンバがフラッシュされた後、時刻 t_1 においてターゲット用のDC電源が、素早く意図した電力レベル、例えば11~16kWに変更される。この後、時刻 t_2 （通常は t_1 の2秒後）において、DC電力を一定に保持しながらアルゴン流を停止する。

【0044】この構成では、全イオン電流は、12kWのDC電力レベルにおいて約0.48Aであると測定された。SSSモードにおける銅のイオン化率は、約20%~25%であったと推定される。SSSモードにおける全銅堆積速度は、約200nm/分であった。後の実験では、約1 μ m/分の堆積速度が実証された。

【0045】この構成は、シリコン酸化物層を貫通するビアとトレンチの双方を用いてテストされた。ベDESTALが-200VDCでDCバイアスされると、トレンチのボトムカバレッジが改善された。ビアに関しては、-50VDCのベDESTALバイアスが最も良好な底部充填を与えた。

【0046】本発明は、上述の実施形態に限定されるものではない。均一性を高めるために更に複雑な構成の磁石アセンブリを使用してもよい。本発明は、銅や銅合金だけでなくプラズマを自己持続し得る他の金属にも適用することができる。バイアスグリッドは、長射程のPVDリアクタに好適に適用することができる。1個以上のグリッドをターゲットとベDESTALの間に配置してもよく、各々のグリッドは個別にバイアスしてもよい。例えば1個を接地し、ベDESTALにより近い方の1個をRFバイアスしてもよい。

【図1】



*【0047】このように、本発明は、従来のPVDリアクタにわずかな変更を加えるだけで銅やその他の材料の自己持続スパッタリングを提供する。更に、グリッドの平面形状とウェーハを個別にバイアスする能力により、付加的な処理制御、特に高いアスペクト比のビアを充填するための処理制御が与えられる。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来のPVDリアクタの概略断面図である。

【図2】本発明に係るPVDリアクタの一実施形態の概略断面図である。

【図3】本発明で使用可能なチムニーグリッドの等角図である。

【図4】本発明のマグネトロンの一実施形態の磁石アセンブリの拡大図であり、一部が断面図、別の一部が斜視図となっている。

【図5】図4のマグネトロンの回転自在支持体の図であり、一部が断面図、別の一部が平面図となっている。

【図6】本マグネトロンの径方向の移動を可能にする図5の回転自在支持体の変形例の断面図である。

【図7】本磁石アセンブリの別の実施形態の平面図である。

【図8】本発明の実験例に関する最小持続条件を示す図である。

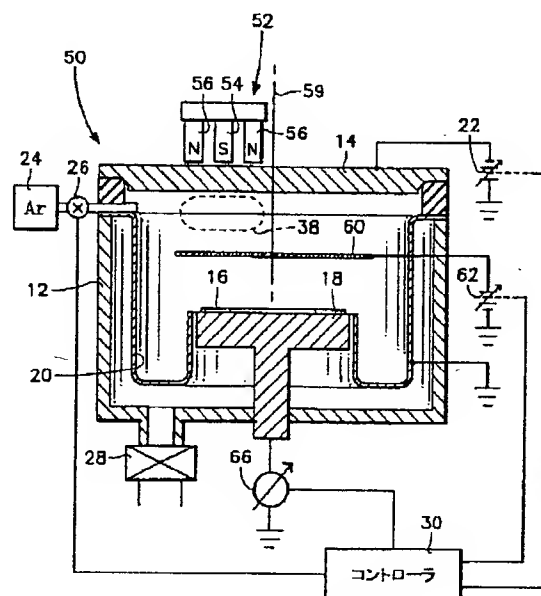
【図9】持続セルフスパッタリングプラズマを点火するためのタイミング図である。

【符号の説明】

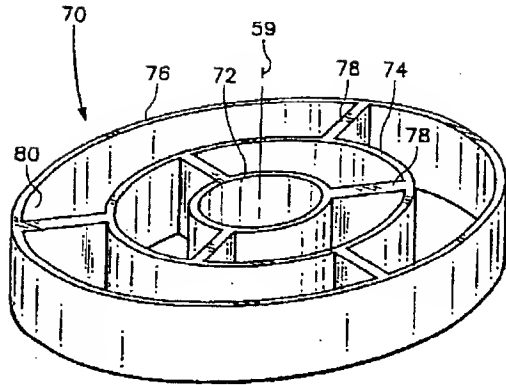
14…ターゲット、16…ウェーハ、18…ベDESTAL、38…高密度プラズマ領域、50…PVDリアクタ、52…マグネトロン、54および56…磁石、60

*30…グリッド電極。

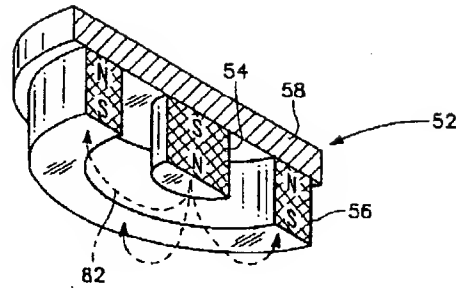
【図2】



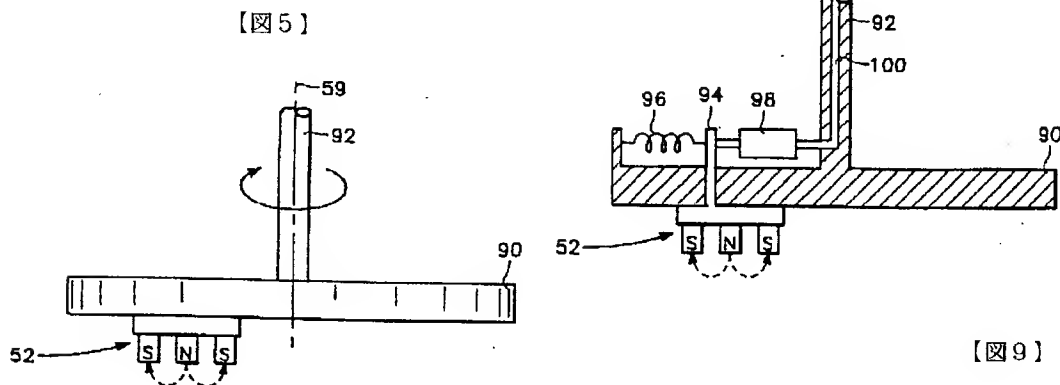
【図3】



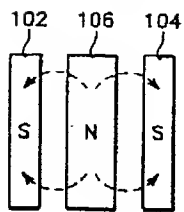
【図4】



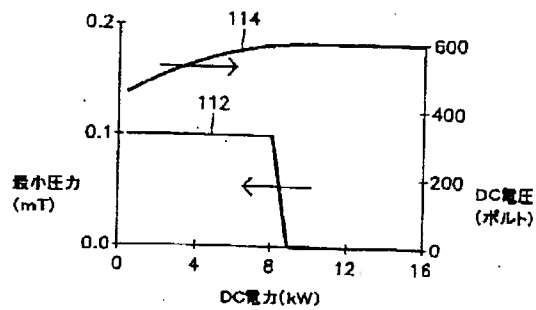
【図6】



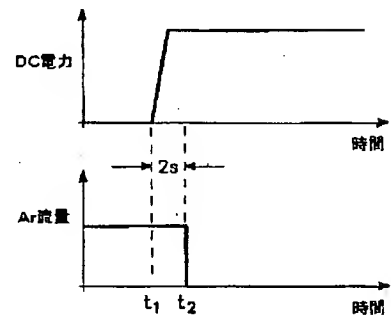
【図7】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 ベイジュン ディン
アメリカ合衆国、カリフォルニア州、
サン ノゼ、ウェスト リヴァーサイド
ウェイ 1020

(72)発明者 ゼン スー
アメリカ合衆国、カリフォルニア州、
フォースター シティ、ハドソン ベ
イ ストリート 279

【外国語明細書】

1. Title of Invention

SUSTAINED SELF-SPUTTERING REACTOR HAVING
AN INCREASED DENSITY PLASMA

整理番号: P 9 8 AM-0 7 8

(2/19)

2. Claims

What is claimed is:

1. A sustained self-sputtering apparatus, comprising:
 - a vacuum chamber including a support for a substrate;
 - a sputtering target in said chamber facing said support;
 - a magnet assembly positioned on a side of said target opposite a central portion of said chamber;
 - a first power supply electrically biasing said target with respect to a portion of said chamber and capable of supporting a self-sustained plasma of ions sputtered from said target;
 - a grid positioned between said target and support and biasable at an electrical potential; and
 - a second power supply electrically biasing said support with respect to said grid.
2. The sputtering apparatus of Claim 1, wherein said second power supply biases said support negatively DC with respect to said grid.
3. The sputtering apparatus of Claim 1, wherein said second power supply is an RF power supply.
4. The sputtering apparatus of Claim 1, wherein said target comprises copper.
5. The sputtering apparatus of Claim 1, wherein said magnet assembly has an area between magnet portions thereof of no more than 25% of an area of said target.
6. The sputtering apparatus of Claim 1, wherein said grid is positioned in a range of 2 to 6cm away from said target.

整理番号: P 9 8 AM-0 7 8

(3 / 1 9)

7. The sputtering apparatus of Claim 1, further comprising:
a disk rotatable about said central axis and having a slot within which said magnet assembly slides; and
motive means mounted on said disk and selectively controlling a position of said magnet assembly in said slot;
whereby said magnet assembly is additionally reciprocally and linearly movable parallel to a plane of a face of said target.
8. A sputtering method in a sputtering chamber comprising a target, a magnet assembly on a side of said target, a substrate support for supporting a substrate, and a grid positioned between said target and said support, said method comprising the steps of:
holding said grid at a predetermined potential;
igniting a plasma in said chamber adjacent to said target; and
after said plasma has been ignited, holding an interior of said chamber at a pressure of less than 5×10^{-5} Torr and applying sufficient electrical power to said target to self-sustain a target plasma in a volume of said chamber adjacent to said magnet assembly.
9. The method of Claim 8, wherein said target comprises copper.
10. The method of Claim 8, further comprising moving said magnet assembly about a back of said target.
11. The method of Claim 10, wherein said moving step includes a sub-step of rotating said magnet assembly about an axis passing through said target and an independent sub-step of reciprocally translating said magnet assembly in a direction parallel to a face of said target.
12. The method of Claim 8, wherein said sufficient power is less than 20kW.

整理番号 : P 9 8 A M - 0 7 8

(4 / 1 9)

13. The method of Claim 8, wherein said igniting step comprises:
flowing a working gas into said chamber;
applying electrical power to target to ignite said working gas into a plasma; and
ceasing said flowing said working gas while continuing said applying sufficient
electrical power to said target to self-sustain said target plasma.

14. The method of Claim 9, wherein said pressure is no more than 10^{-6} Torr.

整理番号 : P 9 8 AM - 0 7 8

(5 / 1 9)

3. Detailed Description of Invention

FIELD OF THE INVENTION

The invention relates generally to plasma processing of workpieces such as semiconductor integrated circuits. In particular, the invention relates to the physical vapor deposition (PVD) with sustained self-sputtering.

BACKGROUND ART

A critical part of any advanced semiconductor integrated circuit involves the one or more metallization levels used to contact and interconnect the active semiconductor areas, themselves usually residing in a fairly well defined crystalline silicon substrate. Although it is possible to interconnect a few transistors or other semiconductor devices, such as memory capacitors, within the semiconductor level, the increasingly complex topology of multiply connected devices soon necessitates another level of interconnect. Typically, an active silicon layer with transistors and capacitors formed therein is overlaid with a dielectric layer, for example, silicon dioxide. Contact holes are etched through the dielectric layer to particular contacting areas of the silicon devices. A metal is filled into the contact holes and is also deposited on top of the dielectric layer to form horizontal interconnects between the silicon contacts and other electrical points. Such a process is referred to as metallization.

A single level of metallization may suffice for simple integrated circuits of small capacity. However, dense memory chips and especially complex logic devices require additional levels of metallization since a single level does not provide the required level of interconnection between active areas. Additional metallization levels are achieved by depositing over the previous metallized horizontal interconnects another level of dielectric and repeating the process of etching holes, now called vias, through the dielectric, filling the vias and overlaying the added dielectric layer with a

整理番号 : P 9 8 A M - U 7 8

(6 / 1 9)

metal, and defining the metal above the added dielectric as an additional wiring layer. Very advanced logic device, for example, fifth-generation microprocessors, have five or more levels of metallization.

Conventionally, the metallized layers have been composed of aluminum and aluminum-based alloys additionally comprising at most a few percent of alloying elements such as copper and silicon. The metallization deposition has typically been accomplished by physical vapor deposition (PVD), also known as sputtering. A conventional PVD reactor 10 is illustrated schematically in cross section in FIG. 1, and the illustration is based upon the Endura PVD Reactor available from Applied Materials, Inc. of Santa Clara, California. The reactor 10 includes a vacuum chamber 12 sealed to a PVD target 14 composed of the material to be sputter deposited on a wafer 16 held on a heater pedestal 18. A shield 20 held within the chamber protects the chamber wall 12 from the sputtered material and provides the anode grounding plane. A selectable DC power supply 22 biases the target negatively to about -600VDC with respect to the shield 20. Conventionally, the pedestal 18 and hence the wafer 16 is left electrically floating.

A gas source 24 of sputtering working gas, typically chemically inactive argon, supplies the working gas to the chamber through a mass flow controller 26. A vacuum system 28 maintains the chamber at a low pressure. Although the base pressure can be held to about 10^{-7} Torr or even lower, the pressure of the working gas is kept between about 1 and 1000mTorr. A computer-based controller 30 controls the reactor including the DC power supply 22 and the mass flow controller 26.

When the argon is admitted into the chamber, the DC voltage between the target 14 and the shield 20 ignites the argon into a plasma, and the positively charged argon ions are attracted to the negatively charged target 14. The ions strike the target 14 at a substantial energy and cause target atoms or atomic clusters to be sputtered from the target 14. Some of the target particles strike the wafer 16 and are thereby deposited on it, thereby forming a film of the target material.

To provide efficient sputtering, a magnetron 32 is positioned in back of the target 14. It has opposed magnets 34, 36 creating a magnetic field within the chamber

整理番号 : P 9 8 A M - 0 7 8

(7 / 1 9)

in the neighborhood of the magnets 34, 36. The magnetic field traps electrons, and for charge neutrality, the ion density also increases to form a high-density plasma region 38 within the chamber adjacent to the magnetron 32.

With the continuing miniaturization of integrated circuits, the demands upon the metallization have increased. Many now believe that aluminum metallization should be replaced by copper metallization. Murarka et al. provide a comprehensive review article on copper metallization in "Copper metallization for ULSI and beyond," *Critical Reviews in Solid State and Materials Science*, vol. 10, no. 2, 1995, pp. 87-124. Copper offers a number of advantages. Its bulk resistivity is less than that of aluminum, $1.67\mu\Omega\text{-cm}$ vs. $2.7\mu\Omega\text{-cm}$ for pure material, and any reduction in resistivity offers significant advantages as the widths and thicknesses of the metallization interconnects continue to decreased. Furthermore, a continuing problem with aluminum metallization is the tendency of aluminum atoms in an aluminum interconnect carrying a high current density to migrate along the interconnect, especially away from hot spots, in a process called electromigration. Any excessive amount of such migration will break an aluminum interconnect and destroy the integrated circuit. Copper-based alloys exhibit significantly reduced levels of electromigration.

Copper metallization is an unproven technology and is acknowledged to offer difficulties not experienced with the conventional aluminum metallization. However, it may afford ways to circumvent problems inherent in aluminum metallization.

One problem inherent in conventional sputtering is that it is performed in a fairly high pressure of the inert working gas, such as argon. However, the argon environment presents two problems. First, it is inevitable that some argon ions are deposited on the substrate and incorporated into the sputter deposited aluminum. Although the effect of these usually inactive argon ions is not precisely known, it is probably not positive.

The second problem relates to the directionality of the sputtered particles. Sputtering to fill holes relies at least in part on the sputtered particles being ballistically transported from the target to the wafer, that is, without scattering from the initial course. The ballistic trajectories allow the sputtered particles to arrive at the wafer

整理番号: P 9 8 AM - 0 7 8

(8 / 19)

nearly perpendicularly to the wafer's surface and thus to deeply penetrate into any aperture. However, the typical sputtering is performed in an argon ambient of from 1 to 100mTorr. Such a high pressure means that there is a significant probability that the aluminum sputter particles will collide with the argon atoms and thus be deflected from their ballistic paths. Accordingly, low-pressure sputtering is believed to provide better hole filling for deep vias. However, low pressure is generally equated with low deposition rates so that reducing the pressure is not a favored method for better directionality. Furthermore, a minimum pressure approaching 1mTorr is required to support a plasma in the usual configuration of FIG. 1.

High-density plasma (HDP) sputter reactors are being actively developed and are approaching commercialization. One of the advantages of HDP sputtering is that a sizable fraction of the sputtered particles are ionized during their travel toward the substrate. Then, the pedestal supporting the wafer can be selectively biased by an RF source to create a DC self-bias with respect to the positively charged plasma. As a result, the wafer can be biased negatively with respect to the plasma (-20V being a typical value), and the positively charged sputtered ions are accelerated from the generally neutral plasma toward the substrate. The added velocity provides a highly directional flux normal to the plane of the substrate, thus reaching deeply into holes of high aspect ratios. Nulman in European Patent Publication 703,598-A1 discloses inserting a negatively biased grid between the substrate and the HDP source using argon working gas.

There has been much recent interest in the PVD deposition of copper films using sustained self-sputtering (SSS), for example, as disclosed by Posadowski et al. in "Sustained self-sputtering using a direct current magnetron source," *Journal of Vacuum Science and Technology, A*, vol. 11, no. 6, 1993, pp. 2980-2984. No working gas is used in sustained self-sputtering, at least after the plasma has been ignited. Instead, a sufficient number of the atoms sputtered from the target are ionized and are then attracted back to the target at sufficiently high energy to serve as the sputtering ions in place of the more typical argon ions.

The condition for achieving self-sustained sputtering, which is observed only

整理番号: P 9 8 AM - 0 7 8

(9 / 1 9)

with some target materials under special conditions, may be expressed as

$$\alpha \cdot \beta \cdot S_m = 1, \quad (1)$$

where α is the ionization fraction of the atoms sputtered from the target, β is the ratio of sputtered atoms that return to the target, and S_m is the self-sputtering yield, that is, the number of copper atoms in the case of a copper target that are sputtered from the target by one returning copper atom. The ionization fraction and the return ratio depend upon the material and the current density, but they are necessarily less than unity. Generally the product $\alpha\beta$ increases at high current density. Hence, a large value of the self-sputtering yield is crucial for sustained self-sputtering, and a high current density is also important. The conventional metallization material Al and other metals used with Al hole filling, viz., Ti, Mo, W, and Ta, have sub-unity self-sputtering yields, thus precluding their use in sustained self-sputtering. However, Cu has an acceptable value of self-sputtering, as do Pd, Pt, Ag, and Au.

Asamaki et al. have reported the SSS deposition of copper in "Copper self-sputtering by planar magnetron," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 33, pt. 1, no. 5A, 1994, pp. 2500-2503 and in "Filling of sub- μ m through holes by self-sputter deposition," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 33, pt. 1, no. 8, 1994, pp. 4566-4569. They reported in the last reference very good bottom coverage in 0.4 μ m holes having aspect ratios of about 3.

However, the known SSS work has been of an experimental nature and several difficult problems need to be addressed before sustained self-sputtering can be commercialized for the mass integrated circuit market.

Most new semiconductor fabrication equipment is being developed for wafer sizes of 200mm, and, in view the burgeoning developments for fabricating 300mm wafers, new technology such as copper SSS needs to be shown to be usable at 200mm and believed to be scalable to 300mm. Even for 200mm wafers, the typical target diameter for commercial PVD reactors is about 325mm.

Achieving uniform PVD deposition over 200mm at a reasonable deposition rate even for conventional PVD of aluminum has been challenging. Parker in U.S. Patent

整理番号: P 9 8 AM - 0 7 8

(10/19)

5,242,566 and Tepman in U.S. Patent 5,320,728 disclose magnetrons having a generally linear array of magnets arranged along the outline of a kidney shape and the array being rotated at the back of the target about a point either within the kidney shape or a point having both halves of a diameter passing through the kidney shape. This magnet array has a size of about the size of the wafer for a 325mm target over a 200mm wafer. The large size of the magnet array is consistent with the trend to larger magnets. However, we have tested the conventional Tepman design for sustained self-sputtering of copper but could not achieve sustained self-sputtering.

A conventional Tepman magnetron produces a magnetic field within the chamber of about 200 gauss. This magnetic intensity is somewhat low for sustained self-sputtering which requires a high plasma density, which depends at least in part on a high magnetic intensity. However, the extended arrangement of Tepman presents some more fundamental problems.

First, the electrons in a high-density (HDP) plasma tend to quickly diffuse to the sides. In the kidney arrangement of Tepman, as with other linear magnetic arrays, the linearly concentrated magnetic field distribution is surrounded on two sides by low-field regions. That is, the HDP electrons tend to diffuse away from the HDP region and be lost, thereby reducing the plasma density from the high levels required for SSS.

Secondly, the region of relatively high magnetic field in the Tepman arrangement extends over a relatively large fraction of the target. Although this large coverage may promote uniformity, it means that for a given amount of electrical power applied to the target the large area reduces the power density into the high-density plasma. For large commercial PVD reactors, the amount of target power required with the Tepman magnetron to sustain self-sputtering becomes excessive.

Reports of sustained self-sputtering of copper seem to indicate that a current density of about $200\text{mA}/\text{cm}^2$ is required. For 50mm targets, the DC power applied to the target for successful SSS with a stationary magnet in fairly conventional PVD reactors has been 6kW; for 100mm targets, 16kW; for 200mm targets, 20kW. The scaling trend indicates that for 200mm and 300mm wafers, which require significantly larger targets for uniformity, the DC bias powers will be 35kW to 50kW, assuming a

整理番号 : P 9 8 A M - 0 7 8

(1 1 / 1 9)

conventionally sized magnetron of the prior art. These power levels are considered to be impractical in commercial equipment. A 12kW power supply is considered to be economically advantageous, and a 20kW one to be marginally acceptable.

For these reasons, it is desirable to achieve sustained self-sputtering at a reduced power level even for large targets. It is further desirable to provide additional directional control of sputtered ions.

SUMMARY OF THE INVENTION

A sustained self-sputtering plasma reactor, particularly applicable to sputtering copper, in which the density of the plasma adjacent to the magnetron is increased by decreasing the area of the magnet assembly, preferably a circularly arranged magnet, and by positioning an anode grid between the target and the substrate being sputter deposited. The small magnet size, particularly with a magnet assembly having a compact shape with a small aspect ratio, enables self-sustained sputtering with modest target power. The uniformity of sustained self-sputtering with a small magnet is enhanced by rotating and otherwise moving the magnetron about the back of the target. The pedestal supporting the substrate may be biased relative to the grid, e.g., DC or RF biasing to increase the directionality of the sputtered particles incident on the substrate.

Uniformity of sputtering is increased by scanning the magnet in one or two dimensions about the back of the target.

整理番号 : P 9 8 AM-0 7 8

(12/19)

DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

We believe that many of the problems associated with applying sustained self-sputtering to the commercial market can be reduced if not solved by reducing the volume of the high-density plasma associated with the magnetron. These method will as well provide additional controls which are useful for improving uniformity, providing a more anisotropic sputtered particle flux, and reducing device damage.

Three interrelated features of a novel SSS PVD reactor 50 are schematically illustrated in cross-section in FIG. 2. These features present non-major changes over the conventional argon-based PVD reactor 10 of FIG. 1, thus simplifying its development and field maintenance.

A new reduced-size magnetron 52 may comprise a button magnet 54 of one polarity and a annular magnet 54 of the other polarity facing the back of the target 14. A magnetic yoke 58 on the back of the magnets 54, 56 confines the magnetic field. The magnetron 52 may be positioned away from a central axis 59 of the chamber and be circularly scanned about that axis 59 to improve the uniformity. The small size of the magnetron 52 reduces the threshold power levels for sustained self-sputtering.

A grid electrode 60 is positioned between the target 14 and the pedestal 18. It may be grounded to thereby serve as the anode or may be electrically biased, preferably positively, by a second variable DC power supply 62 or yet alternatively may be RF biased to increase the plasma density. However, we believe that grounding the grid 60 is sufficient for many applications. The grid 60 is preferably positioned about 2 to 6cm from the target 14. This position is not close enough to interfere with the electron trajectories in the high-density plasma 38, but is close enough to still effectively act as

整理番号: P 9 8 AM - 0 7 8

(1 3 / 1 9)

an anode, that is, close enough that the geometry is planar to prevent plasma spreading. The grid electrode provides a more planar geometry to thus increase the density of the magnetron plasma and also provides additional controls over the ion transport.

The pedestal 18 may be electrically biased, particularly with respect to the grid 60, by a selectable power supply 66, which may be a DC power supply, an RF power supply, or a combination. This pedestal biasing can be performed relatively independently of the electrical biasing conditions required for generating the plasma and increasing the plasma ion density. Hence, the pedestal bias can be more freely optimized for highly directional hole filling and other processing characteristics.

In the conventional reactor 10 of FIG. 1, the high-density plasma region 38 is coupled between the cathode target 14 and the anode shield 20. As a result, there is a significant horizontal component of the electric field, and a significant fraction of the plasma ion current is grounded to the shield, thereby reducing the effective ion current and tending to spread out the high-density plasma region 38. That is, the plasma density is not all that high.

In the inventive reactor 50 of the invention of FIG. 2, the grid electrode 60 acts as an anode grid in planar opposition to the major portion of the cathode target 14. The planar geometry reduces the tendency of the high-density plasma 38 to spread and disperse to a lower density. The fraction of sputter ions lost to the shield 20 is significantly reduced over the conventional reactor.

The grid 60 may be a screen-like grid of minimal thickness and high transparency. Alternatively, it may be a metal honeycomb or a metal collimator plate of substantial thickness drilled with many narrow through holes. Yet further alternatively, it may be a chimney-like structure 70, illustrated isometrically in FIG. 3, comprising three coaxial metal tubes 72, 74, 76 mechanically and electrically linked by offset sets of metal ribs 78. The tubes 72, 74, 76 and ribs 78 have minimal cross section along the axis 59 of the reactor 50 to thereby provide relatively large axial apertures 80. Tepman discloses a somewhat similar collimating chimney for a different use in U.S. Patent 5,527,438. In use with the present invention, the chimney 70 is placed inside the shield 20 and is either grounded to it or separately electrically biased by the second DC power

整理番号: P 9 8 A M - 0 7 8

(1 4 / 1 9)

supply 62.

The plasma characteristics are nearly completely defined by the target 14 and grid anode 60. As a result, the pedestal power supply 66 can more freely apply a biasing condition to the wafer 16 based on processing considerations with lesser regards for the need to support the plasma. For example, the pedestal 18 can be biased negatively with respect to ground to accelerate the positively charged sputter ions passing through the grid 60 and thus increase their directionality for filling deep apertures. On the other hand, a lesser negative bias will reduce the energy of incident ions to reduce substrate damage.

The plasma between the grid 60 and the pedestal 18 in sustained self-sputtering is not believed to be the typical equilibrium plasma. Electron energies have been measured to be about 5eV, far above the values in normal sputtering and indicating low collision rates for the plasma electrons. Nonetheless, a rarefied plasma is believed to exist below the grid 60 and to extend close to the pedestal 18, and a plasma sheath is believed to exist next to the pedestal 18, perhaps because of electrostatic effects. As a result, the pedestal 18 may be RF biased to create a DC self-bias relative to the plasma ions.

The magnetron 52 of the invention is substantially smaller than in the conventional reactor. As an example, as shown in the enlarged perspective, partially sectioned view of FIG. 4, the circular button magnet 54 with its north pole, for example, pointing downwardly is surrounded by the ring magnet 56 with its south pole pointing downwardly. The disk-shaped magnetic yoke 58 intensifies the magnetic field 82 adjacent to the target 14. The circular configuration of the magnet assembly provides a more efficient high-density plasma since the resultant high-density plasma region 38 is substantially circular, having only one free lateral side from which the electrons can escape. The magnetic cusp beneath the button magnet 54 is small enough in area that the electrons can diffuse across it.

As illustrated in FIG. 2 with reference to FIG. 4, the area of the magnet assembly is substantially less than half or even a quarter of the area of the target being sputtered, thereby reducing the total target power required for a high target power

整理番号 : P 9 8 A M - 0 7 8

(1 5 / 1 9)

density in the high-density plasma region 38.

If the magnet array of the magnetron 52 is arranged in a circle as illustrated, then the diameter of the magnet assembly is less than half of the diameter of the area of the target being sputtered. That is, its area is less than 25% of that of the target. We have experimentally determined that a magnet assembly needs to have a maximum diameter of no more than 125mm (maximum area of 123cm²) to enable a 9kW power supply to sustain self-sputtering. For a 20kW power supply, the estimated maximum area is 272cm² (maximum diameter of 185mm). The magnetron 52 is placed completely away from the central axis 59. In order to provide uniformity, the magnetron needs to be circumferentially scanned about the central axis 56, as is done by Parker and Tepman as well although their magnet assemblies essentially encompass the central axis 59. This scanning can be accomplished, as illustrated in FIG. 5 by rigidly mounting the magnetron 52 on a disk 90 which rotates on a shaft 92 extending along the central axis 59.

It may be desired to further increase the sputtering uniformity by, as illustrated schematically in FIG. 6, including a dynamic radial positioning mechanism on the rotating disk that can be actuated from a stationary point. The uniformity has the advantage of increasing target utilization with full face erosion and reducing particles arising from redeposition on unsputtered areas. An example of the radial positioning mechanism is to support the magnetron 52 on a rod 94 sliding in an unillustrated radial slot in the disk 90. The rod 92 is biased in one radial direction by a spring 96 and is selectively forced in the opposite radial direction by a pneumatic actuator 98 selectively supplied with fluid pressure through a pressure line 100 extending into and upwardly along the rotation shaft 92 which rotates the disk 90. A unillustrated rotational seal at the top of the shaft 90 connects to a fixed fluid line that is selectively energized to a variable pressure. Thereby, the magnetron is both rotated about the central axis 56 and is moved reciprocally in a linear direction parallel to the face of the target 14.

The circular magnet configuration of FIG. 4 affords the advantages of a compact planar area of the high-density plasma 38 so that electron loss is minimized and the current density threshold for sustained self-sputtering is reduced. Expressed

整理番号 : P.9 8 AM - 0 7 8

(1 6 / 1 9)

quantitatively, the circular configuration provides an aspect ratio of 1:1 where the aspect ratio is defined as the maximum lateral dimension of the magnet assembly to the minimum lateral dimension. These dimensions include only those areas in which a strong magnetic field exists between oppositely polarized magnets or areas extending laterally outside by approximately the separation of the oppositely polarized magnets. Thus, the minimum lateral dimension of the Tepman configuration is the curved length of the kidney shape. An aspect ratio of near unity minimizes the side surface area over which electrons can be lost. Another magnet configuration with an aspect ratio near unity, illustrated in the plan view of FIG. 7, includes two rectangular magnet poles 102, 104 of one polarity facing out of the illustration bracketing another rectangular magnet pole 106 of the opposed polarity. Each pole 102, 104, 106 may be composed of multiple smaller magnets of the same polarization arranged into the shape of the pole. The width of the assembly is approximately equal to its illustrated height so that the aspect ratio is approximately 1.4, that is, the ratio of the diagonal to the width. Other magnet configurations are possible, for example, an oval version of FIG. 4 or a slightly elongated or compressed version of FIG. 7. A preferred range for aspect ratios is between 1:2 and 2:1.

Experiment

The concept of sustained self-sputtering of copper was tested with several of the features mentioned above. The button and ring magnets of FIG. 4 were used with a total diameter of 11.5cm. Thus, the magnet area was 15% of that of the 325mm copper target. The magnets were composed of NdBF_e and were estimated to produce a magnetic field of 800 gauss inside the chamber. The magnetron was placed away from the central axis and was rotated about that axis. The chimney grid of FIG. 3 was used as a grounded anode grid, although in one experiment a honeycomb collimator was instead used. A spacing between the target and substrate was maintained in a range of 10 to 16cm.

In a first series of experiments with this configuration, various levels of DC power were applied to the copper target. For each level, the argon flow was reduced until the plasma was extinguished. At the minimum flow level, the chamber pressure

整理番号 : P 9 8 AM - 0 7 8

(1 7 / 1 9)

and the target voltage were measured. The results are shown in FIG. 8 in which curve 112 gives the minimum argon pressure to support a plasma and curve 114 gives the target voltage at that pressure, both as a function of the DC power applied to the target. It is seen that for lower target power, a minimum argon pressure of about 0.1mTorr is required. However, at 9kW and above, no argon is required to sustain the plasma. Chamber pressure with the self-sputtering plasma was measured at between 10^{-6} and 10^{-7} Torr. It is believed that these pressures could be reduced with care to bake out and the like. It is noted that these low chamber pressures during sustained self-sputtering correspond to a mean free scattering length of about 30m and longer so there is no appreciable gas scattering in a commercially realizable chamber. This length indicates that a chamber pressure of 10^{-5} Torr or even 5×10^{-5} Torr during sustained self-sputtering is acceptable, although a pressure of no more than 10^{-6} Torr is preferred. As described later, at these pressures, the argon is not discharged across the chamber. The target voltage is somewhat increased for the sustained self-sputter plasma, but is in the neighborhood of about -600VDC.

One operational feature of sustained self-sputtering is that the plasma does not self-ignite, but a sputtering working gas needs to be initially supplied until the target begins supplying the sputtering particles. One timing diagram useful for igniting the SSS plasma is illustrated in the timing diagrams of FIG. 9. Argon is initially flowed into the chamber at rates known to sustain a plasma. After the argon flow has stabilized and the chamber has been flushed, at a time t_1 , the DC power supply for the target is quickly changed to the intended power level, for example, between 11 and 16kW. Then, at a time t_2 , typically 2s after t_1 , the flow of argon is stopped with the DC power being held constant.

In this configuration, the total ion current was measured to be about 0.48A at a DC power level of 12kW. The ionization fraction of copper in the SSS mode is estimated to have been about 20% to 25%. The total copper deposition rate in the SSS mode was about 200nm/min. Later experiments have demonstrated a deposition rate of about 1 μ m/min.

This configuration was tested with both trenches and vias through a silicon

整理番号: P 9 8 AM - 0 7 8

(1 8 / 1 9)

oxide layer. When the pedestal was DC biased at -200VDC, the trench bottom coverage was improved. For vias, pedestal biasing at -50VDC provided the best bottom filling.

The invention is not limited to the described embodiments. More complex configurations of the magnet assembly may be used to improve uniformity. The invention can be applied not only to copper and copper alloys, but also to other metals capable of self-sustaining a plasma. The biased grid can be advantageously applied to long-throw PVD reactors. More than one grid may be placed between the target and the pedestal, and each may be separately biased. For example, one may be grounded and another closer to the pedestal may be RF biased.

Thus, the invention provides for self-sustained sputtering of copper and other materials with only minor changes over the conventional PVD reactor. Further, the planar geometry of the grid and the ability to separately bias the wafer provides additional processing control, particularly for filling vias of high aspect ratios.

整理番号: P 98 AM-078

(19/19)

4. Brief Description of Drawings

FIG. 1 is a schematic cross-sectional view of a conventional PVD reactor.

FIG. 2 is a schematic cross-sectional view of one embodiment of a PVD reactor according to the invention.

FIG. 3 is an isometric view of a chimney grid usable with the invention.

FIG. 4 is an enlarged view, partly in cross section and partly in perspective, of the magnet assembly of an embodiment of the magnetron of the invention.

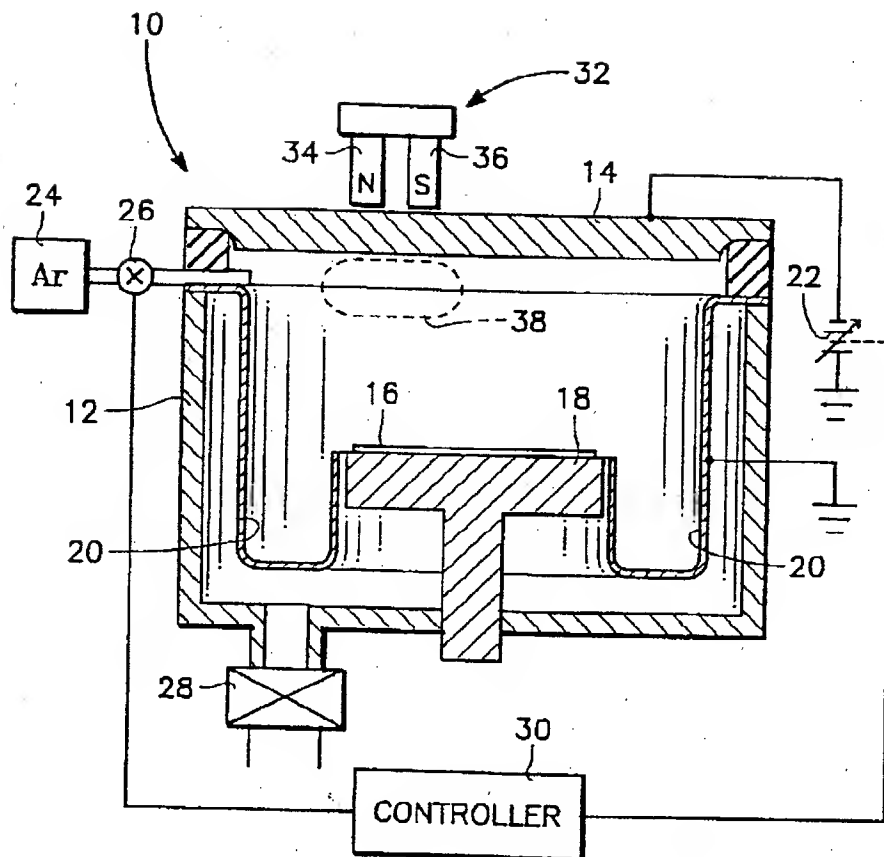
FIG. 5 is a view, partially in section and partially in plan, of the rotatable support of the magnetron of FIG. 4.

FIG. 6 is a cross-sectional view of a modification of the rotatable support of FIG. 5 which allows radial movement of the magnetron.

FIG. 7 is a plan view of an alternative embodiment of the magnet assembly.

FIG. 8 is a chart showing minimum sustaining conditions for an experimental embodiment of the invention.

FIG. 9 is a timing diagram for igniting a sustained self-sputtering plasma.



(PRIOR ART)

FIG. 1

(2)



FIG. 2

P98AM-078

(3)

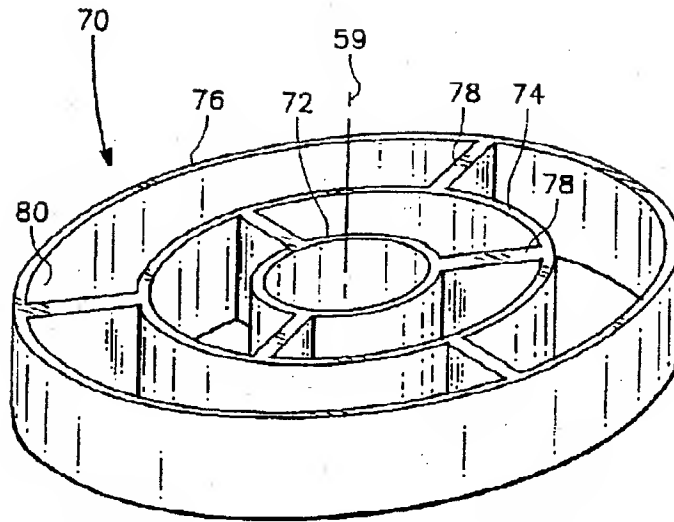


FIG. 3

P 9 8 A M - 0 7 8

(4)

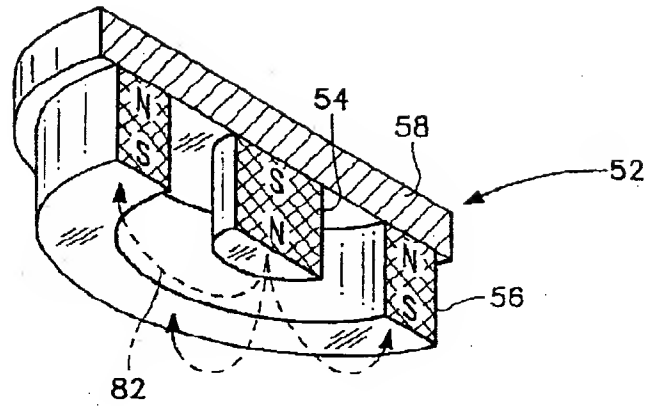
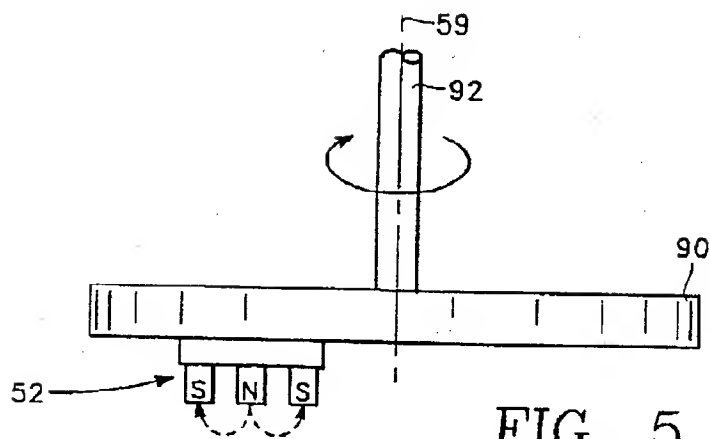


FIG. 4

P 98AM-078

(5)



P98AM-078

(6)

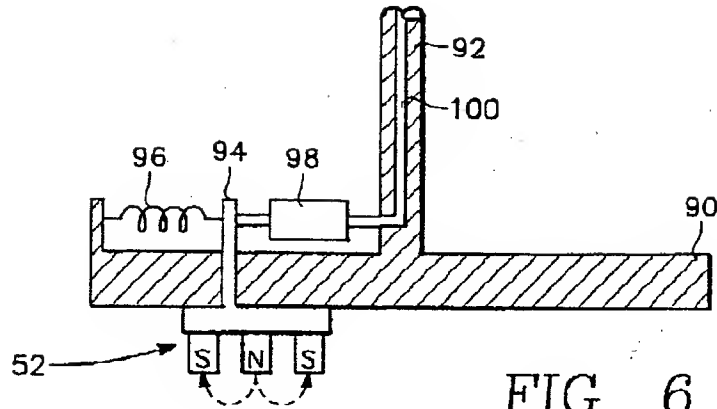


FIG. 6

P98AM-078

(7)

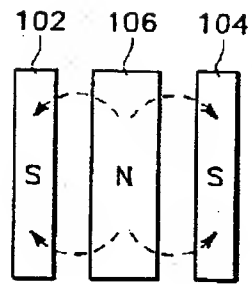


FIG. 7

P98AM-078

(8)

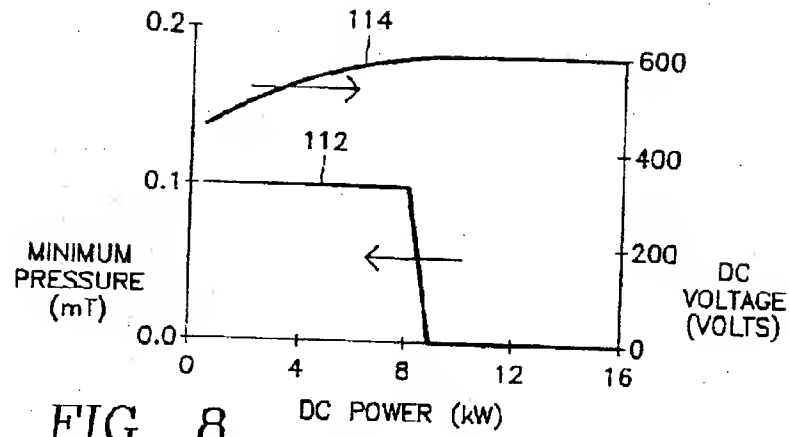


FIG. 8

DC POWER (kW)

P 9 8 A M - 0 7 8

(9)

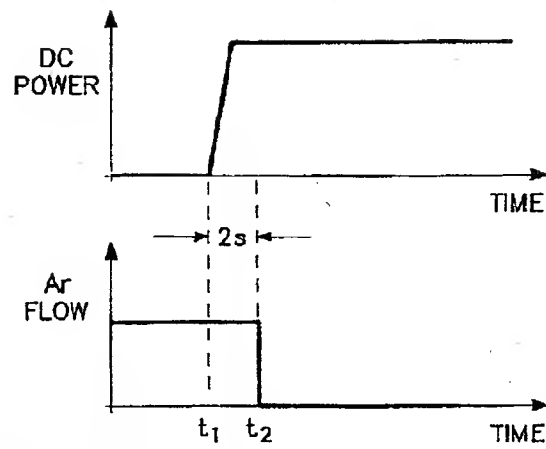


FIG. 9

1. Abstract

ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

A plasma reactor for physical vapor deposition (PVD), also known as sputtering, which is adapted so that the atomic species sputtered from the target can self-sustain the plasma without the need of a working gas such as argon. The self-sustained sputtering (SSS), which is particularly applicable to copper sputtering, is enabled by several means. The density of the plasma in the region of the magnet assembly of the magnetron is intensified for a fixed target power by reducing the size of the magnets. To provide more uniform sputtering, the small magnetron is scanned in one or two dimensions over the back of the target. The density of the plasma next to the target is also intensified by positioning an anode grid between the target and the substrate, which provides a more planar geometry. Additionally, the substrate can then be biased to more effectively control the energy and directionality of the flux of sputtered particles incident on the wafer.

2. Representative Drawing

Fig. 2